

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



مطالعه آزمایشگاهی رفتار خاک رس تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن تحت اثر چرخه‌های تر و خشک شدن*

مقاله پژوهشی

نیلوفر پیشوایی(۱) مرتضی جیریایی شراهی(۲) مسعود عامل سخی(۳)

DOI: 10.22067/jfcei.2023.74674.1112

چکیده *هنگام مواجهه با خاکهای نامرغوب، به علت ایجاد مشکلات فنی و اقتصادی می‌توان خصوصیات خاک را در محل بهسازی نمود. یکی از روشهای متداول بهسازی، افزودن مواد تثبیت‌کننده به خاک است. در این پژوهش تثبیت‌کننده لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن مورد مطالعه قرار گرفته تا امکان افزایش مقاومت فشاری و دوام در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن خاکهای رسی بررسی شوند. در تحقیق حاضر آزمایشهای حدود اتربرگ، تراکم استاندارد و مقاومت تک محوری انجام شد. همچنین مدت زمان عمل آوری بهینه برای خاک تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم به دست آمد. آزمایش تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر وزن و مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با لیگنوسولفونات انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن لیگنوسولفونات به خاک رس تغییری در دوام خاک در برابر تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن ایجاد نمی‌کند، اما افزودن ٤٪ الیاف پلی‌اتیلن به خاک، دوام نمونه‌ها را در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن افزایش می‌دهد (به میزان ٦٠٠ ٪). منظور از دوام عدم کاهش وزن و در نتیجه مقاومت به میزان قابل توجه در اثر تکرار تر و خشک شدن است. همچنین افزودن الیاف پلی اتیلن به عنوان مسلح کننده به خاک رس تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم، موجب کاهش از دست دادن جرم خاک در چرخه‌های تر و خشک شدن می‌شود (به میزان ۷۰ ٪).*

واژه‌های کلیدی تثبیت خاک، لیگنوسولفونات کلسیم، الیاف پلی اتیلن، چرخه تر و خشک شدن.

Laboratory Investigation on Stabilization of Clay with Calcium Lignosulfonate and Polyethylene Fibers under wetting and drying cycles

Niloofar Pishvaei Morteza Jiryaei Sharahi Masoud Amelsakhi

Abstract *Stabilizing materials can be used as a soil improvement technique when dealing with inappropriate soils. This study investigates the effects of wetting and drying cycles on the clayey soil stabilized with Calcium Lignosulfonate and also polyethylene fibers. For this purpose, unconfined compression strength and durability of the prepared samples under wetting and drying cycles are investigated. Atterberg limit tests, standard compaction tests and unconfined compression tests have been performed on the prepared samples. Also, the optimum curing duration for soil stabilized with lignosulfonate is investigated. The results show that lignosulfonate-stabilized clay was not sufficiently durable against wet and dry cycles. Based on this result, the stabilization of clay with lignosulfonate stabilizer has a great weakness that is the main drawback to the use of this stabilizer. Addition of 4% polyethylene fibers increases the durability of stabilized samples up to 600% against wet and dry cycles. Also, adding polyethylene fibers to stabilized clay soil with lignosulfonate reduces the weight loss of the materials (70%).*

Keywords Soil stabilization, Calcium lignosulfonate, Polyethylene Fibers, Wetting and drying cycle.

---

* تاریخ دریافت مقاله۱۴۰۰/۱۰/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۲/۲٦می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، ایران.

(۳) استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، ایران.

Email: jiryaei@qut.ac.ir

مقدمه

گاهی خاک موجود در محل احداث پروژه‌ها از دیدگاه مهندسی برای فعالیتهای عمرانی، ایدئال و کاملاً مطلوب نیست. مروری بر تاریخچه ساخت و سازهای بشری و سیر تحولات آنها نشان می‌دهد که از دیرباز تا کنون، روشهای مقاوم‌سازی خاک و بستر شالوده‌ها و لایه زیر اساس روسازی راهها، یکی از مشکلات اساسی در فعالیتهای عمرانی است. با توجه به افزایش جمعیت و نیاز بشر به ایجاد سازه‌های مقاوم و مستحکم و همچنین مشاهده خسارات ناشی از زلزله، تغییرات اقلیمی و سایر بلایای طبیعی، روشهای مختلف تقویت و بهسازی خاک به طور روز افزون گسترش یافته است [1,3].

خاک رس یکی از خاکهایی است که به وفور در طبیعت یافت می‌شود و در صورت وجود در بستر و لایه‌های روسازی مشکلاتی را ایجاد می‌کند. خاکهای رسی به ویژه خاکهای رسی نرم دارای خواص خمیری بالایی هستند و افزایش رطوبت موجب کاهش مقاومت برشی، مقاومت فشاری و تغییر حجم آنها می‌گردد[4]. پس تثبیت خاکهای رسی قبل از شروع انجام پروژه، بسیار حائز اهمیت است. عملیات تثبیت خاک عبارت است از بهبود مشخصات فنی خاک و افزایش مقاومت آن برای قابل استفاده کردن در یک کاربرد معین که انواع آن عبارت است از تثبیت مکانیکی، بیولوژیکی، فیزیکی، شیمیایی و الکتریکی. یکی از روشهای رایج برای تثبیت خاک نیز، استفاده از مواد افزودنی می‌باشد[5].

افزودنیهای شیمیایی مانند سیمان، آهک و خاکستر بادی جنبه‌های مناسبی از پایدارسازی خاکهای نرم و ناپایدار را از خود نشان داده‌اند. پژوهشهای صورت گرفته نشان می‌دهد که افزایش میزان سیمان موجب افزایش مقاومت برشی بیشینه، چسبندگی و سختی برشی می‌شود. در حالی که مقاومت پسماند و نهایی در اثر فرایند سیمانی شدن تغییری نمی‌کند[6-7].

با این وجود معمولاً تثبیت‌کننده‌های سنتی شیمیایی به دلیل مسائل زیست‌محیطی به آسانی قابل پذیرش نیستند. این افزودنیها همچنین با تغییر در PH خاک موجب کاهش ظرفیت خاک و نگهداری آب و انتقال مواد مغذی می‌شوند که در نتیجه پوشش گیاهی محدود می‌گردد و کیفیت آبهای زیرزمینی کاهش می‌یابد [۸]. از سوی دیگر خاکهای تثبیت شده با افزودنیهای سنتی رفتار شکننده‌ای از خود، به ویژه تحت بارهای دوره‌ای نشان می‌دهند [۹]. برای حل این مشکلات لازم است از یک تثبیت‌کننده جایگزین استفاده شود، به طوری که بتواند استحکام و دوام خاک را بدون آسیب زدن به محیط زیست بالا ببرد. به تازگی ماده شیمیایی مبتنی بر لیگنین، لیگنوسولفونات کلسیم (LS) در پایدار-سازی خاکهای مسئله‌دار به خوبی ایفای نقش کرده است[10-9]. لیگنوسولفونات کلسیم یک ترکیب پلیمری است که از عصاره چوب حاصل می‌شود و از مواد دور ریز صنعت چوب و کاغذ است. لیگنوسولفونات کلسیم شامل اجزای هیدروفیلی است که شامل سولفونات، هیدروکسیل فنیل و هیدروکسیل الکل می‌شود و محصول جانبی صنایع چوبی و کاغذی می‌باشد و به صورت مایع خام یا با استفاده از سایر افزودنیها در خاک استفاده می-شود[9]. سالانه ۵۰ میلیون تن از این ماده دور ریخته می‌شود، لیگنوسولفونات کلسیم با محیط زیست سازگار بوده و برای سلامت انسان خطرآفرین نمی‌باشد. همچنین استفاده از این ماده باعث کاهش هزینه‌ها و پیدایش راهکاری برای جلوگیری از دورریز این ماده در حجم وسیع می‌باشد. از آنجایی که لیگنوسولفونات به عنوان تثبیت‌کننده شیمیایی غیرخورنده و غیر سمی شناخته می‌شود، افزودن این تثبیت‌کننده به خاک سبب ایجاد مشکلات زیست‌محیطی آب و خاک نمی‌گردد. در مقایسه با افزودنیهای شیمیایی سنتی، لیگنوسولفونات ارزانتر، دوستدار محیط زیست و بی خطرتر می‌باشد و به طور کامل در آب انحلال‌پذیر است. یکی از ویژگیهای قابل توجه این تثبیت‌کننده، افزایش مقاومت نمونه بدون تغییر در PH و شکل‌پذیری خاک است[11-13].

پژوهشهای صورت گرفته نشان می‌دهد که با افزایش مقدار لیگنوسولفونات مقاومت بیشینه، مقاومت نهایی و سختی برشی افزایش یافته است. همچنین افزایش میزان مقاومت بیشینه و نهایی به صورت خطی می‌باشد و طبق پژوهشهای انجام گرفته، به منظور رسیدن به مقاومت مورد نظر در برابر فرسایش، مقدار کمتری از لیگنوسولفونات نسبت به سیمان مورد نیاز است [٦، ٧ و ١٤].

وینود و همکاران [6] در سال ۲۰۱۱ دریافتند که افزودنی لیگنوسولفونات به طور قابل توجهی مقاومت خاک رسی با خاصیت خمیری کم را بهبود بخشیده است. همچنین با استفاده از دستگاهی به منظور شبیه‌سازی فرایند فرسایش در ترکهای داخلی در خاکهای تثبیت شده با لیگنوسولفونات انجام داده‌اند و

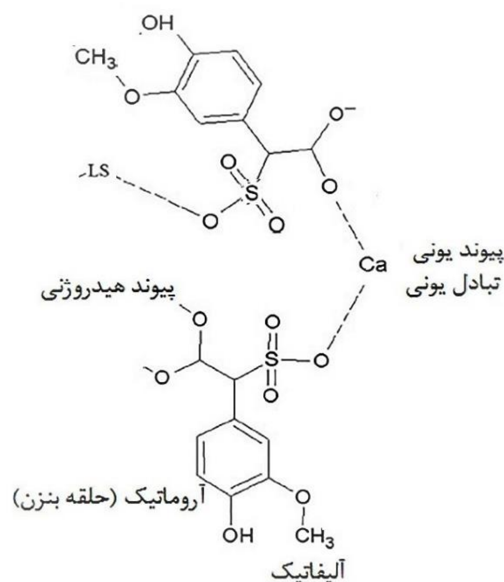
گزارش داده‌اند که به مقدار کمتری از لیگنوسولفونات نسبت به سیمان برای افزایش مقاومت در برابر فرسایش نیاز است.

ایندراراتنا و همکاران[۷] در سال ۲۰۱۵ دریافتند که لیگنوسولفونات تأثیر به سزایی بر روی مقاومت برشی و کرنش حجمی در خاکهای ماسه سیلت‌دار دارد که با افزایش میزان لیگنوسولفونات تنش‌برشی افزایش و کرنش‌برشی رفتار اتساعی از خود نشان می‌دهد.

ایلیس و همکاران [15] در سال ۲۰۱۷ با پژوهش روی تثبیت خاک رس با سیمان و الیاف پلی اتیلن دریافتند که مقدار بهینه پلی اتیلن (PE) برای تثبیت خاک رس، ٤٪ می‌باشد. این مقدار فیبر بیشترین چسبندگی و بالاترین مقاومت را در خاک ایجاد میکند.

تانگبدی و نورزاد[16] در سال ۲۰۱۷ دریافتند که لیگنوسولفونات کلسیم باعث کاهش حد روانی خاک نیز می‌شود، ولی حد خمیری را تغییری نمی‌دهد پس باعث کاهش شاخص خمیری خاک نیز می‌شود و رفتار مهندسی آن را بهبود می‌بخشد. همچنین در اثر افزودن لیگنوسولفونات کلسیم به خاک رس، حداکثر وزن مخصوص خشک خاک کاهش و رطوبت بهینه افزایش می‌یابد.

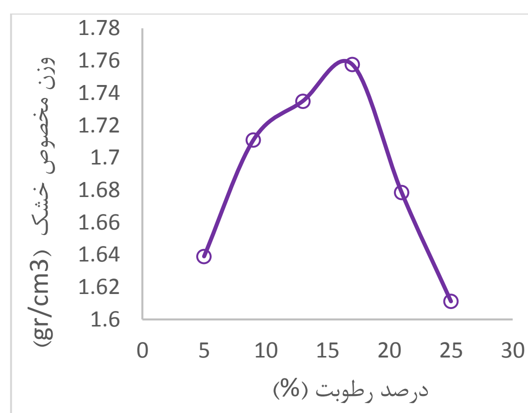
گیاهی و جیریایی [17] در سال ۱٤۰۰روی تثبیت خاک رس با LS پژوهشی انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه افزودنی LS برای خاک CL، در حدود ۱ ٪ است. لازم به ذکر است مقدار بهینه از افزودنی برای هر خاک منحصر به فرد است و به ترکیب شیمیایی خاک پایه بستگی دارد. بررسی تغییرات مورفولوژی خاک با استفاده از نتایج تست میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان می‌دهد که در اثر افزودن لیگنوسولفونات‌کلسیم، مرزهای بین ذرات رس از بین رفته و خاک با ایجاد پیوندهای هیدروژنی و کووالانسی به صورت توده‌ای از ذرات خاک به هم پیوسته تشکیل شده است. در اثر تشکیل این پیوندها تعداد حفرات موجود در خاک کمتر شده و ذرات رس بزرگتر شده‌اند. این تغییرات در مورفولوژی خاک باعث بهبود خواص مکانیکی خاک تثبیت‌شده نسبت به خاک پایه شده است. ساختار شیمیایی لیگنوسولفونات کلسیم در شکل (۱) نشان داده شده است. هدف اصلی از این پژوهش که در ادامه پژوهش گیاهی و همکاران انجام شده است بررسی تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن تثبیت با لیگنوسولفونات کلسیم بر جرم و مقاومت تثبیت است یا به عبارت دیگر دوام تبیت با لیگنوسولفونات کلسیم در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن. منظور از دوام عدم کاهش وزن یا مقاومت قابل توجه در اثر تکرار چرخه‌های تر و خشک شدن است به نحوی که تثبیت بتواند مقاومت و سختی مورد نظر را داشته باشد. همچنین نتیجه آزمایش به صورت تعداد چرخه (سیکل) و کاهش میزان وزن ثبت می‌شود. فرض این تحقیق بر این است که به علت آب‌دوست بودن لیگنوسولفونات کلسیم تثبیت دوام لازم در برابر تکرار چرخه‌های تر و خشک شدن را نداشته باشد که در این صورت نیاز است که راهکاری برای این مشکل پیشنهاد کرد. راهکاری که در این تحقیق با توجه به مطالعات پیشین پیشنهاد شده است [18] استفاد از مسلح‌کننده‌های طبیعی و مصنوعی مانند فیبر پلی اتیلن است زیرا از یک طرف لیگنوسولفونات باعث افزایش مقاومت و بهبود رفتار خاک می‌شود و نیاز به فیبرها را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد (اقتصادی است) و از طرف دیگر مسلح‌کننده‌ها مانند فیبرها دوام تثبیت با لیگنوسولفونات کلسیم در برابر تکرار چرخه‌های تر و خشک شدن را به میزان قابل توجه افزایش می‌دهند. بنابراین در این پژوهش تثبیت‌کننده لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن به عنوان مسلح‌کننده مورد مطالعه قرار گرفته تا امکان افزایش مقاومت فشاری و دوام در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن خاکهای رسی بررسی شود. در تحقیق حاضر آزمایشهای حدود اتربرگ، تراکم استاندارد و مقاومت تک محوری انجام شده است. همچنین مدت زمان عمل آوری بهینه برای خاک تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم به دست آمد. آزمایش تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر تغییر وزن و مقاومت نمونه‌های تثبیت شده با لیگنوسولفونات انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن لیگنوسولفونات به خاک رس تغییری در دوام خاک تحت اثر چرخه‌های تر و خشک شدن ایجاد نمی‌کند. اما افزودن ٤٪ الیاف پلی اتیلن به خاک، دوام را افزایش می‌دهد (٪٦۰۰). همچنین افزودن الیاف پلی اتیلن به خاک رس تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم، موجب کاهش از دست دادن جرم خاک در چرخه‌های تر و خشک شدن می‌شود (٪۷۰).



شکل ۱ ساختار شیمیایی لیگنوسولفونات کلسیم

مواد و مصالح

خاک رس. خاک مورد استفاده در این پژوهش از قسمت شمال شهر قم و عمق نیم متری زمین برداشت شده است. با استفاده از نتایج آزمایشهای دانه‌بندی (ASTM C136)، تراکم استاندارد (ASTM D4718) و حدود اتربرگ (ASTM D427) و بر اساس طبقه‌بندی متحد، خاک از نوع رس با شاخص خمیری پایین است. مشخصات خاک در جدول (۱) نشان داده شده است. همچنین نمودار تراکم در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ نمودار تراکم خاک رس (درصد رطوبت بهینه ۱۷ درصد)

جدول ۱ ویژگیها و خصوصیات فیزیکی خاک مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی / خصوصیت خاک	نام / مقدار
نام‌گذاری طبق سیستم متحد	CL
چگالی جامد (Gs)	۲/۷۵
رطوبت طبیعی خاک	٪۳/۵
حد روانی (LL)	٪۲۵/۱
حد خمیری (PL)	٪۱۵/۳
شاخص خمیری (PI)	٪۹/۸
رطوبت بهینه	٪۱۷
بیشینه وزن مخصوص خشک (N/m^3)	۱۷۵۷۰

لیگنو سولفونات کلسیم (LS). لیگنوسولفونات کلسیم مورد استفاده، دورریز و پسماند صنعت کاغذ و تمبر سازی است که طی فرایند صنعتی پس از جداسازی تکه‌های چوب به دست می‌آید. اندازه و شکل ظاهری پودر لیگنوسولفونات کلسیم شباهت زیادی به سیمان دارد و اندازه دانه‌های آن در حدود ۱۰ الی ۲۵ میکرون است [۱۷]. نمونه‌ای از لیگنو سولفونات کلسیم که در این تحقیق استفاده شده است در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ پودر لیگنوسولفونات کلسیم مورد استفاده در این تحقیق

الیاف پلی اتیلن (PE). پلی اتیلن شامل ساختار بسیار ساده‌ای است، به طوری که ساده‌تر از تمام پلیمرهای تجاری است. یک مولکول پلی‌اتیلن زنجیر بلندی از اتمهای کربن است که به هر اتم کربن دو اتم هیدروژن چسبیده است.

پلی اتیلن یک ماده پلیمری است که از واحدهای منفرد اتیلن تشکیل شده است. اتیلنها به صورت زنجیره‌ای به دنبال هم آرایش یافته‌اند و مولکول بزرگ پلیمری را تشکیل داده‌اند. ماده اولیه پلی‌اتیلنها از نفت خام به دست می‌آید. مشخصات فیزیکی الیاف پلی اتیلن در جدول (۲) که توسط کارخانه سازنده گزارش شده است، نشان داده شده است. همچنین نمونه‌ای از الیاف پلی اتیلن در شکل (٤) نشان داده شده است.

برنامه آزمونهای آزمایشگاهی

گیاهی وجیریایی در تحقیقی در دانشـــگاه صـــنعتی قم که روی درصــــد بهینه لیگنوســـولفونات در اختلاط با خاک رس CL و روشهای اختلاط کار کردند.

جدول ۲ مشخصات فیزیکی الیاف پلی‌اتیلن

نام الیاف	الیاف پلی اتیلن
دانسیته پلی اتیلن (gr/cm^3)	۰/۹۵
استحکام (gr/denier*)	۸ – ٤/٥
مدول (gr/denier)	۳۰
کرنش شکست(٪)	۲۰–۱۰

* دنیر معادل گرم در ۹۰۰۰ متر از فیبر



شکل ٤ الیاف پلی اتیلن

آنها نشان دادند که مقدار بهینه لیگنوسولفونات برای ساخت نمونه‌ها، ۱٪ است. همچنین آنها نتیجه گرفتند که بهترین روش برای اختلاط، اضافه کردن لیگنوسولفونات به خاک و مخلوط کردن آنها با هم و سپس اضافه کردن آب است که درصد رطوبت بهینه در این حالت ١٦/٥١ ٪ گزارش شده است[17]. در این تحقیق که ادامه کار تحقیق مذکور است و اینکه نمونه خاک مورد آزمایش در این پژوهش هم همان CL است، مقدار بهینه لیگنوسولفونات برای ساخت نمونه‌ها، ۱٪ و رطوبت بهینه ١٦/٥١ ٪ در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای اختلاط ابتدا لیگنوسولفونات به خاک اضافه و مخلوط می‌شود و سپس آب اضافه می‌شود. برای آماده سازی نمونه‌های تثبیت شده از قالبی با قطر ۳۸ و ارتفاع ۷٦ میلی‌متر استفاده شد. با استفاده از وزن مخصوص حداکثر به دست آمده از آزمایش تراکم و حجم قالب، وزنِ مخلوطِ خاک، آب و لیگنو که باید پس از اختلاط در قالب کوبیده شوند به دست می‌آید. آب مورد نیاز با توجه به رطوبت بهینه و مقدار لیگنوسولفونات کلسیم با توجه به میزان ۱ ٪ وزنی به راحتی محاسبه می‌شود. ضمناً وزن خاک که باید در قالب کوبیده شود تا تراکم به حداکثر وزن مخصوص برسد محاسبه می‌شود. سپس از اختلاط خاک با لیگنوسولفونات کلسیم و آب، نمونه در حداکثر وزن مخصوص خاک که از آزمایش تراکم به دست آمده بود، ساخته شد. در همین راستا خاک در ۵ لایه یکسان ریخته شد و به صورت استاتیکی (کوبش استاتیکی به تعداد ۲۵ ضربه برای هر لایه) متراکم گردید. وزن واحد حجم خشک نمونه‌های تک محوری نیز مطابق با حداکثر وزن مخصوص خشک حاصل از آزمایش تراکم استاندارد است. نیرو یا فشار استاتیکی بهترین روش تراکم خاکهای چسبنده (سیلت و رس) است. لازم به ذکر است پس از کوبیدن هر لایه سطح آن به اندازه ۳ میلی‌متر خراشیده شد تا لایه‌ها از هم جدا نباشند و نمونه‌ای همگن به دست بیاید. پس از خارج سازی نمونه‌ها از قالب تک محوری، با پلاستیک دو لایه محصور شده و در اتاقی با دمای کنترل شده به مدت ۷ و ١٤ و ۲۱ و ۲۸ و ۳۵ روز عمل آوری شدند. از هر آزمونه با شرایط یکسان ۳ تست تکرار انجام شده است و میانگین آنها ثبت شده است. در این مرحله ۱۵ نمونه خاک تثبیت شده با ۱٪ لیگنوسولفونات برای ۵ حاالت مدت عمل آوری ساخته شد. سرعت بارگذاری آزمایش تک محوری نیم میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. همچنین ٦ نمونه تثبیت شده با ۱٪ لیگنوسولفونات برای پس از چرخه اول و چرخه دوم تر و خشک شدن ساخته شد. ۲۱ نمونه تثبیت شده با ۱٪ لیگنوسولفونات و ٤ ٪ فیبر پلی اتیلن هم برای پس از چرخه صفر، دوم، چهارم، ششم، هشتم، دهم و دوازدهم ساخته شد.

بررسی دوام تثبیت تحت چرخه‌های تر و خشک‌شدن. نمونه‌ها با ۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم ساخته سپس عمل آوری شده و وزن و حجم آنها اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها به ترتیب در چرخه‌های تر و خشک قرار گرفتند. طبق ASTM D 559 هر چرخه شامل ۵ ساعت قرار گرفتن در آب ۲±۲۳ درجه سانتی- گراد و سپس ٤۲ ساعت قرار گرفتن در گرمخانه ۲±۷۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در این مرحله ١٦ نمونه برای برای بررسی دوام تثبیت در برابر

تعداد متفاوت از چرخه تر و خشک شدن ساخته شد که نتایج ۹ نمونه از آنها شامل صفر، یک و دو چرخه تر و خشک شدن در بخش ٤ این مقاله نشان داده خواهد شد. نمونه‌ها برای سه و بیشتر چرخه تر و خشک شدن گسیخته شدند.



شکل ٥ نمونه‌های تثبیت شده تحت اثر چرخه تر و خشک

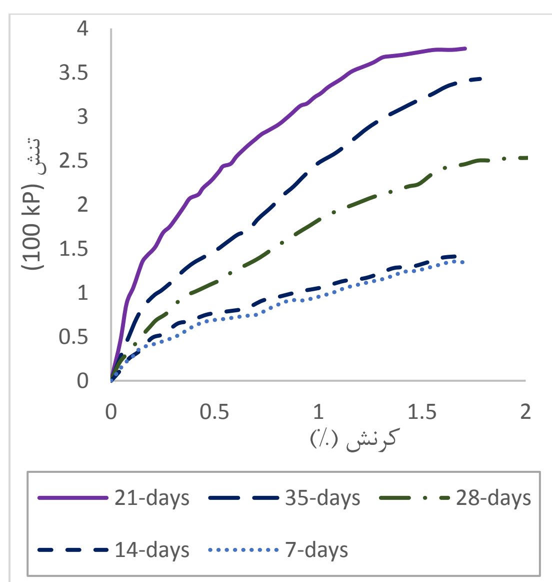
بررسی دوام تثبیت با لیگنوسولفونات‌کلسیم و الیاف پلی‌اتیلن. در این مرحله نمونه‌ها با ۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم و٤٪ فیبر پلی اتیلن ساخته و عمل آوری شد. سپس وزن و طول آنها اندازه‌گیری شده و حجم آنها به دست آمد. پس از آن نمونه‌ها طبق ASTM D 559 تحت چرخه‌های تر و خشک شدن قرار گرفتند. در این مرحله ۲٦ نمونه برای تعداد چرخه‌های تر و خشک شدن ۰ تا ۱۲ ساخته شد.

نتایج و تحلیل

مدت زمان عمل آوری بهینه تثبیت. نمودار تنش–کرنش به دست آمده از آزمایش تک محوری برای نمونه‌های تثبیت‌شده با ۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم طی تعداد روزهای عمل آوری مختلف در شکل (٦) نشان داده شده است. با توجه به نمودار تنش–کرنش، با افزایش مدت عمل آوری، مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. اما نمونه ۲۱ روز عمل آوری شده مقاومت بیشتری نسبت به نمونه ۲۸ روزه و نمونه ۳۵ روزه دارد (مقاومت نمونه ۲۱روزه حدود ۱۱٪ بیشتر از مقاومت نمونه ۳۵ روزه است). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدت زمان بهینه برای عمل‌آوری خاک رس با ۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم ۲۱ روز است. به نظر می‌رسد علت کاهش مقاومت در مدت عمل آوری ۲۸ و ۳۵ روز، آب دوست بودن تثبیت لیگنوسولفونات کلسیم است به عبارت دیگر در مدت تا ۲۱ روز نمونه‌ها در حال تثبیت و افزاش مقاومت هستند اما پس از آن وجود رطوبت برای عمل آوری باعث حل شدن بخشی از لیگنوسولفونات در همین رطوبت می‌شود و مقاومت کاهش می‌یابد.

دوام تثبیت تحت تأثیر تکرار چرخه‌های تر و خشک. پس از قرار دادن نمونه‌ها در آب در چرخه اول، مشاهده شد که آب به سرعت رنگ گرفته و به نظر می‌رسد که مقداری از لیگنوسولفونات نمونه‌ها، همان ابتدا به سرعت در آب حل می‌شود، به عبارت دیگر لیگنوسولفونات کلسیم آب دوست است.

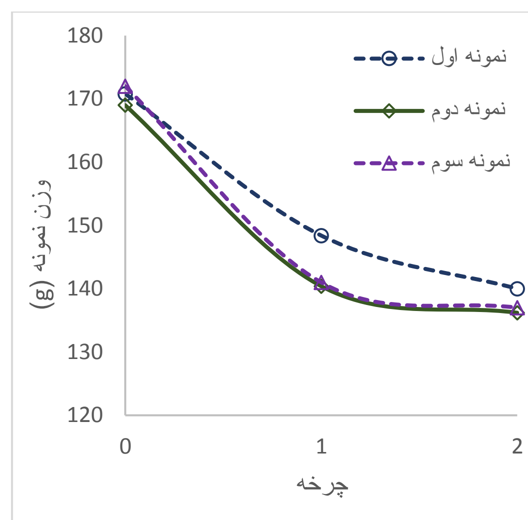
ابتدای چرخه سوم و زمانی که نمونه‌ها در آب بودند، نمونه‌ها به صورت تکه‌های کوچکتر در آب پخش شدند یا به عبارت دیگر گسیخته شدند.



شکل ٦ نمودار تنش–کرنش نمونه‌های بهسازی شده با LS در روزهای عمل آوری متفاوت

در واقع نمونه‌های تثبیت شده با ۱٪ لیگنوسولفونات ، ۲ چرخه تر و خشک شدن دوام آوردند. شکل (۷) وزن نمونه‌های تثبیت شده با LS را پس از هر چرخه تر و خشک شدن نشان می‌دهد. می‌توان دریافت که نمونه‌ها پس از چرخه اول حدود ۱٤ ٪ و پس از چرخه دوم حدود ۲۰ ٪ جرم خود را از دست داده‌اند. علت این امر همان طور که قبلاً مطرح شد آب‌دوست بودن اختلاط است. شکل (۸) نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با LS پس از یک و دو چرخه تر و خشک شدن می‌باشد. از نمودار نتیجه‌گیری می‌شود که مقاومت نمونه تثبیت شده با ۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم پس از هر چرخه تر و خشک

شدن کاهش پیدا کرده است. یکی از دلایل کاهش مقاومت نمونه‌ها، به نظر می رسد تخریب واکنشهای پوزولانی در طول چرخه‌های تر و خشک شدن و همچنین کاهش جرم نمونه‌ها پس از هر چرخه در اثر آب‌دوست بودن تثبیت با لیگنوسولفونات است.

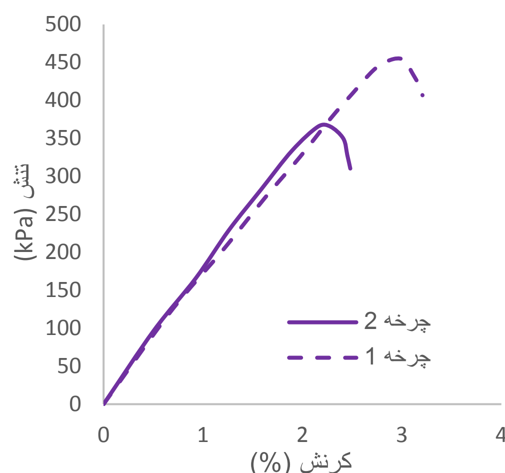


شکل ۷ نمودار کاهش وزن نمونه‌های تثبیت شده با LS در چرخه‌های اول و دوم تر و خشک شدن

همچنین امکان دارد که شکسته شدن ذرات خاک به علت تغییر فشار هوای حبس شده داخل حفرات خاک هنگام تر و خشک شدن باشد که باعث تسریع در کاهش مقاومت شود. تغییر فشار هوای حبس شده در اثر تغییر مکش، که برابر تفاضل فشار هوا از فشار آب حفره‌ای است، رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که مکش در اثر افزایش رطوبت کاهش می‌یابد.

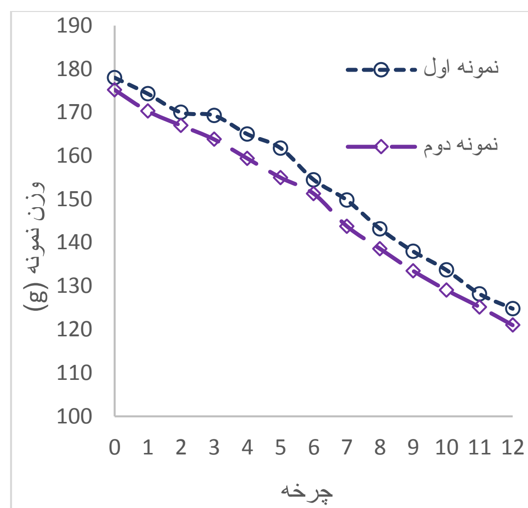
نتایج دوام تثبیت با لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی – اتیلن. به دلیل اینکه نمونه‌های تثبیت‌شده با لیگنوسولفونات فقط ۲ چرخه تر و خشک شدن را دوام آوردند، نمونه‌ها را با الیاف پلی اتیلن مسلح کرده تا دوام تثبیت تحت اثر مسلح سازی بررسی شود. به دلیل خاصیت کششی الیاف، ممکن است در بالا بردن دوام مؤثر واقع شوند.

واقعیت این است که بسیاری از مواد افزودنی مانند همین لیگنو سولفونات کلسیم که در تثبیت به کار می‌روند آب‌دوست هستند و بنابراین تناوب تر و خشک شدن مشکل جدی ایجاد می‌کند به نحوی که کاربرد این مواد افزودنی را زیر سوال می‌برد. تسلیح ممکن است چاره کار باشد تا بتوان از این مواد دور ریز استفاده کرد.



شکل ۸ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با LS در چرخه‌های اول و دوم تر و خشک شدن

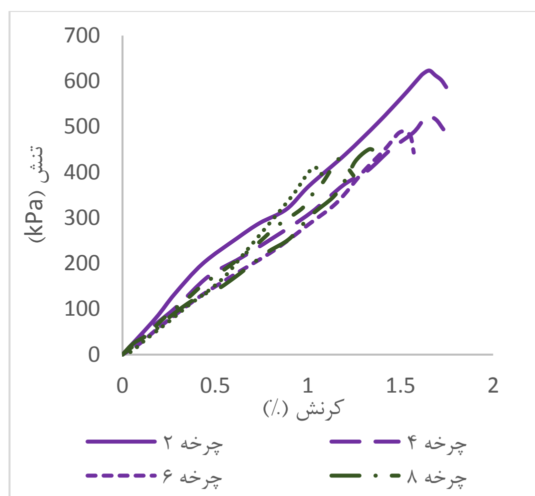
در این مرحله ۲۶ نمونه ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌های تثبیت‌شده با لیگنوسولفونات و مسلح شده با الیاف پلی اتیلن ۱۲چرخه تر و خشک‌شدن و بیشتر دوام آوردند. وزن و مقاومت آنها بعد از هر چرخه اندازه‌گیری شد. شکل ۹ وزن نمونه‌های تثبیت شده با لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن پس از هر چرخه تر و خشک شدن آمده است. نمونه‌ها پس از گذشت ۱۲ چرخه تر و خشک شدن، ۳۰٪ کاهش جرم داشته‌اند. از مقایسه شکلهای (۷) و (۹) می‌توان دریافت که نمونه‌هایی که فقط با لیگنوسولفونات کلسیم تثبیت شده بودند پس از گذشت ۲چرخه تر و خشک شدن ۲۰٪ جرم خود را از دست داده‌اند، در حالی که نمونه‌های تثبیت شده با لیگنوسولفونات و تسلیح شده با الیاف پلی اتیلن پس از گذشت ۲ چرخه تر و خشک شدن تنها ۵٪ جرم خود را از دست داده‌اند و پس از گذشت ۱۲ چرخه، ۳۰٪ از جرمشان کاسته شده است. نتیجه می‌شود که الیاف پلی اتیلن موجب کنار هم نگه داشتن ذرات خاک شده و کاهش جرم خاک در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن را کم می‌کند.



شکل ۹ وزن نمونه‌های تثبیت شده با LS و PE پس از چرخه‌های متفاوت تر وخشک شدن

در شکل (۱۰) نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت نمونه‌ها مشاهده می‌شود. همان طور که در نمودار شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، پس از پایان هر چرخه تر وخشک شدن مقاومت نمونه کاهش پیدا می‌کند. همچنین مقایسه دو نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت شده با LS و نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تثبیت‌شده با LS و مسلح شده با PE نشان می‌دهد که الیاف PE به دلیل دارا بودن مقاومت کششی باعث می‌شوند تا خاک در مرز گسیختگی خود مقاومت بیشتری داشته باشد و در نتیجه مقاومت فشاری بالا می‌رود. همچنین باعث دوام خاک در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن می‌شود. زیرا در نمونه‌های تثبیت شده با LS و PE نسبت به نمونه‌های تثبیت شده با LS درصد تثبیت کننده بیشتر می‌باشد و در مقایسه با ذرات ریز دانه فاقد چسبندگی خاک، خصوصیات مقاومتی خاک را بهبود می‌بخشد. این طور به نظر می‌رسد که الیاف با توجه به پیوندی که بین ذرات برقرار می‌کنند به صورت غیر مستقیم باعث افزایش چسبندگی می‌شوند.

شکلهای (۱۲) و (۱۱) مقایسه دو نمونه بهسازی شده با LS و نمونه بهسازی شده با LS و PE بعد از گسیختگی می‌باشد. مشاهده می‌شود که الیاف پلی‌اتیلن با توجه به پیوندی که بین ذرات برقرار می‌کنند از خردشدن نمونه هنگام گسیختگی جلوگیری می‌کنند و ذرات خاک را کنار یکدیگر نگه می‌دارند.



شکل ۱۰ نمودار تنش کرنش نمونه‌های بهسازی شده با LS و PE در چرخه‌های (زوج) تر و خشک‌شدن

شکل (۱۳) دوام نهایی نمونه‌های تثبیت نشده، نمونه‌های تثبیت شده با LS و نمونه‌های تثبیت شده با LS وPE را در چرخه های تر و خشک شدن نشان می‌دهد. منظور از دوام نهایی تعداد چرخه‌ای است که پس از آن نمونه نابود می‌شود و مقاومت به صفر می‌رسد. لازم به ذکر است تعداد چرخه ۱۲ متناظر با دوام نهایی نمونه‌های مسلح شده با فیبرهای PE نیست بلکه دوام نهایی نمونه بیشتر از ۱۲ هست.

نتیجه گیری

مدت زمان عمل آوری بهینه برای خاک رس با خاصیت خمیری پایین (CL) تثبیت شده با ۱ ٪ لیگنو سولفونات کلسیم، ۲۱ روز به دست آمد.

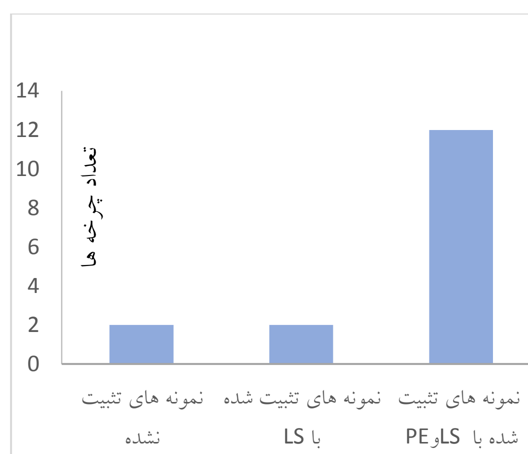


شکل ۱۱ گسیختگی نمونه بهسازی شده با LS پس از چرخه دوم



شکل ۱۲ نمونه بهسازی شده با LS و PE پس از چرخه دوازدهم گسیختگی

– نمونه‌های تثبیت شده با ۱٪ لیگنو سولفونات کلسیم،۲ چرخه تر و خشک شدن دوام آوردند. در حالی که خاک تثبیت نشده مورد استفاده در پژوهش نیز ۲ چرخه تر و خشک شدن دوام آورد. پس لیگنوسولفونات کلسیم به



شکل ۱۳ دوام ترکیبهای متفاوت در برابر چرخه تر و خشک شدن

تنهایی افزایشی در دوام خاک در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن ایجاد نمی‌کند.

– یکی از روشهای اصلاح برای دوام خاکها یا نمونه‌های تثبیت شده که در برابر دوره‌های تر و خشک شدن ضعیف هستند، استفاده از مسلح‌کننده‌های با مقاومت کششی می‌باشد. بنابراین الیاف پلی‌اتیلن به خاک افزوده شد که می‌توان سایر الیاف را هم مورد پژوهش قرار داد. خاک تثبیت شده با ۱٪ لیگنو سولفونات کلسیم و ٤٪ الیاف پلی اتیلن ۱۲ چرخه و بیشتر دوام آوردند. افزودن الیاف پلی اتیلن به خاک، دوام آن را در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن، ٦۰۰٪ افزایش می‌دهد و کاهش جرم خاک را ۷۰٪ کم می‌کند.

– اضافه کردن الیاف PE به خاک به عنوان یک تسلیح که مقاومت کششی دارد و به همین دلیل احتمالاً مقداری مقاومت کشی را افزایش می‌دهد، مقاومت فشاری نمونه‌ها را نیز مقدار کمی افزایش می‌دهد. همچنین الیاف پلی اتیلن از خرد شدن نمونه هنگام گسیختگی جلوگیری می‌کند و ذرات خاک را کنار یکدیگر نگه می‌دارد.

– با توجه به چهار فصل بودن کشورمان، بررسی اثرات پی در پی جوی بر خاکهای تثبیت شده ضروری به نظر می‌رسد. یکی از این اثرات، تکرار تر و خشک شدن است که در صورتی که باعث از بین رفتن مقاومت یا سختی شود مسائلی از قبیل نشست، ترک خوردگی یا حتی ناپایداری را می‌تواند ایجاد کند. لیگنوسولفونات کلسیم و الیاف پلی اتیلن هر دو سازگار با محیط زیست هستند و ارزش آنها فراوانی و ارزانی آنها است. ترکیب نهایی ۱٪ لیگنوسولفونات کلسیم و٤٪ الیاف پلی اتیلن برای بهسازی خاک CL هم مقاومت و هم دوام آن را در برابر چرخه‌های تر و خشک شدن افزایش می‌دهد.

سپاسگزاری

مراجع

[1] S. S. Kutanaei and A. J. Choobbasti, “Effects of Nanosilica Particles and Randomly Distributed Fibers on the Ultrasonic Pulse Velocity and Mechanical Properties of Cemented Sand,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 04016230, 2017.

[2] S. S. Kutanaei and A. J. Choobbasti, “Experimental Study of Combined Effects of Fibers and Nanosilica on Mechanical Properties of Cemented Sand,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, no. 6, pp. 06016001, 2016.

[3] Kutanaei, S.S. and A.J. Choobbasti, “Triaxial behavior of fiber-reinforced cemented sand,” *Journal of adhesion science and Technology*, vol. 30, no. 6, pp. 579-593, 2016.

[4] R. Ebne Jalal and M.Shafiei Bajestan, *Theoretical and practical principles of soil mechanics.* 1st Ed., Ahwaz: Shahid Chamran University, 1992 (in Persian).

[5] H. Tahekhani and H. Salami, “Comparison of Lime, Cement and CBR PLUS Additives for Stabilizing Clay Soil,” *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 263-274, 2013 (in Persian).

[6] J. S. Vinod and B. Indraratna, “A conceptual model for lignosulfonate treated soils,” *13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Australia, pp.296-300, May 9-13, (2011).

[7] B. Indraratna, R. Athukorala, and J. S. Vinod, “Shear behaviour of a lignosulfonate treated silty sand,” *12th Australia New Zealand Conference on Geomechanics: The Changing Face of the Earth – Geomechanics & Human Influence*, New Zealand, pp. 1-8, February 22-25, (2015).

[8] Q. Chen and B. Indraratna, “Shear behaviour of sandy silt treated with lignosulfonate,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 52, no. 8, pp. 1180-1185, 2015.

[9] B. Indraratna, M. Mahamud, and J. S. Vinod, “Chemical and mineralogical behaviour of lignosulfonate treated soils,” *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, USA California, pp. 1146-1155, March 25-29, (2012).

[10] K. Q. Tran, T. Satomi, and H. Takahashi, “Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers,” *Construction and Building Materials*, vol. 178, pp. 204-210, 2018.

[11] A. Sezer, A. Boz, and N. Tanrinian, “An investigation into strength and permittivity of compacted sand-clay mixtures by partial replacement of water with lignosulfonate,” *Acta Physica Polonica A*, Vol.130, No.1, pp.23-27, (2016).

[12] Q. Chen, B. Indraratna, J. Carter, and C. Rujikiatkamjorn, “A theoretical and experimental study on the behaviour of lignosulfonate-treated sandy silt,” *Computers and Geotechnics*, vol. 61, pp. 316-327, 2014.

[13] Q. Chen and B. Indraratna, “Deformation behavior of lignosulfonate-treated sandy silt under cyclic loading,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.141, no. 1, pp. 06014015, 2015.

[14] B. Indraratna, R. Athukorala, and J. Vinod, “Estimating the rate of erosion of a silty sand treated with lignosulfonate,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 139, no. 5, pp. 701-714, 2013.

[15] N. M. Ilieş, A. P. Circo, and A. C. Nagy, “Comparative study on soil stabilization with polyethylene waste materials and binders,” *Procedia Engineering*, vol. 181, pp. 444-451, 2017.

[16] B. Ta'negonbadi and R. Noorzad, “Stabilization of clayey soil using lignosulfonate,” *Transportation Geotechnics*, vol. 12, pp. 45-55, 2017.

[17] A. Giahi, M. Jiryaei Sharahi, and B. Mohammadnezhad, “Evaluation of a by-product and enviromental-friendly chemical additives for clay soils with different mixing and curing methods,” *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 659-674, 2021 (in prsian).

[18] K. Roshan, A. J. Choobbasti, and S. S. Kutanaei, “Evaluation of the impact of fiber reinforcement on the durability of lignosulfonate stabilized clayey sand under wet-dry condition,” *Transportation Geotechnics*, vol. 23, pp. 100359, 2020.